

2차 공기 주입방식에 따른 스토커형 소각로의 연소특성에 관한 수치해석적 연구

정진[†], 김창녕^{*}, 조영민^{**}

경희대학교 기계공학과, *경희대학교 테크노공학대학, **경희대학교 환경·응용화학대학

A Numerical Study on the Combustion Characteristics for Stoker Type Incinerator with Various Injection Type of Secondary Air

Jin Jeong[†], Chang Nyung Kim^{*}, Young Min Jo^{**}

Department of Mechanical Engineering, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

^{*}College of Advanced Technology, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

^{**}College of Environment and Applied Chemistry, Kyunghee University, Yongin 449-701, Korea

(Received June 23, 2003; revision received August 23, 2003)

ABSTRACT: A three dimensional numerical analysis has been conducted for a stoker type incinerator which has the capacity of 1.5 ton/hr. The objective of the present study is to predict the effects of swirl induced by secondary air and to find an optimal operating condition of the incinerator. In this study, combustion characteristics such as distributions of temperature, velocity and concentration of each species have been examined with various injection types of secondary air and with different flow rates of secondary air in the incinerator. It is found that the secondary air injection on the combustion process makes the path of fluid particle longer in the combustor and enhances the mixing between air and combustion gas by arousing a swirl. Therefore, the injection type of secondary air can be an important key in the design process of incinerator.

Key words: Incinerator(소각로), Combustion(연소), Stoker(스토커), Secondary air(2차 공기)

1. 서 론

폐기물은 크게 생활 폐기물과 사업장 폐기물로 나눌 수 있으며, 국내의 경우에 사업장 폐기물은 전체 폐기물의 약 75%를 차지하고 있다. 이러한 폐기물의 처리방법은 크게 매립, 소각, 재활용으로 나눌 수 있다. 과거에는 주로 폐기물을 매립하는 방법을 사용하였으나, 최근 폐기물 처리문제가 환경 및 사회문제로 대두됨에 따라 재활용 및

소각처리 비율이 점차 증가하고 있다. 그러나 아직까지 소각이 차지하는 비중은 5~7%(1997년 기준) 정도로 선진국에 비해 크게 낮은 수준이다. 따라서 정부에서는 각종 부양책을 통하여 폐기물의 소각처리 비율을 높일 계획이다.

현재 국내의 소각로 설계기술은 선진국에 비해 아직 미흡하기 때문에 외국의 소각로 설계기술을 들여오는 경우가 종종 있다. 그러나 국내 폐기물은 외국 폐기물과 성분조성 등이 다르기 때문에 소각로 설계과정에서 외국의 기술을 그대로 적용하기에 다소 어려움이 있다. 따라서 소각로 설계 기술을 확보하기 위해서는 소각로 내의 연소특성에 대한 심도 있는 연구가 요구된다. 특히, 최근

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2869; fax: +82-31-202-8106

E-mail address: jj73@cvs2.khu.ac.kr

에는 컴퓨터 및 전산유체역학(CFD) 기법의 발달에 힘입어 수치해석(시뮬레이션)에 의한 연구가 많이 시도되고 있어 소각로 설계기술이 크게 향상되고 있다.

소각로의 연소특성에 관한 기존의 몇몇 연구내용을 살펴보면 다음과 같다. Ohm and Jang⁽¹⁾은 폐기물의 성상이나 공기주입량의 변화에 따른 연소특성을 예측할 수 있는 간단한 프로그램을 제시하였으며, Park et al.⁽²⁾은 수치해석을 통하여 2차 공기와 재순환영역이 연소특성에 미치는 영향을 예측하고 실험을 통해 검증하였다. Kim et al.⁽³⁾은 수치해석을 이용하여 쓰레기의 조성변화에 따른 연소특성을 연구하였고, Ryu et al.⁽⁴⁾은 기존의 연소모델을 바탕으로 열유동장과 폐기물층 연소를 종합적으로 해석하는 모델을 제시하였다. 또한, Lee et al.⁽⁵⁾은 선화가 연소실 내의 연소특성 및 체류시간에 미치는 영향을 수치해석을 통해 연구하였고, Choi et al.⁽⁶⁾은 폐기물 소각로의 다이옥신 배출특성 및 최적 운전조건에 대하여 연구하였다. 그러나 아직까지 소각로 내의 소각과정에 대한 수치해석에서는 연소모델 및 특정 형상에서의 연소특성에 대한 연구가 주를 이루고 있기 때문에, 소각로의 최적 형상 및 최적 운전

조건에 대하여 더 많은 연구가 이루어져야 한다.

본 연구에서는 실제 소각장에서 사업장 폐기물 소각용으로 사용되고 있는 1,500 kg/hr급 스토커형 소각로에서 2차 공기의 분사방법, 2차 공기 유량 등의 변화에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한, 소각로 내의 유동특성과 연소특성을 예측하여 폐기물 소각로의 효율적인 운전조건을 제시하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 수치해석 모델

본 연구에서는 현재 사업장 폐기물 소각용으로 사용되고 있는 스토커형 소각로에 대하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 계산에 사용된 소각로는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 높이 10.8m, 너비 6.3m, 폭 2m인 스토커형 소각로로서, 소각로의 형식은 중간류식에 해당되며 계단식 화격자를 사용하고 있다. 수치계산에서 화격자는 연소용 가스와 공기의 유량분배를 위하여 Fig.2와 같이 16등분되어 있는 것으로 가정하였다. 투입 폐기물의 구성비, 원소 조성 및 발열량은 Table 1에 나타내었으며, 연소용 가스는 Table 2에 나타낸 바와 같이 실제 소각시 방출되는 가스량과 유사한 분포로 화격자 하부에서 공급되는 것으로 가정하였다. 연소용 공기는 1차 공기와 2차 공기로 구분되며, 1차 공기는 화격자 하부의 primary air와 side air로 구성된다. Primary air는 기공률 0.5로 화격자 하부에서 유입되고, side air는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 양쪽에 각각 47(26+21)개씩 총 94개의 side air hole(직경 25mm)을 통해 공급된다. 또한, 2차 공기는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 2차 연소실 입구부분의 4면에 각각 5개 또는 7개씩 있는 공기구멍(직경 50mm)을 통해 공급된다.

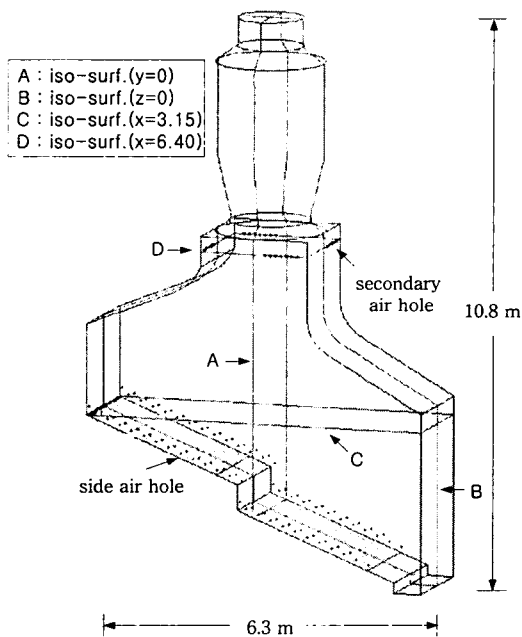


Fig. 1 Schematic diagram of stoker type incinerator.

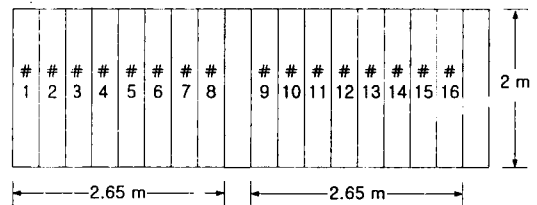


Fig. 2 Schematic diagram of waste bed in stoker type incinerator.

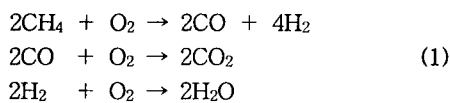
Table 1 Composition of solid waste

Physical composition (%)	Paper	Plastic	Textile	Styrofoam	Rubber	Vinyl	Leather	Wood	Etc.
	31.3	9.4	11.0	6.0	2.3	30.6	1.1	5.0	3.3
Ultimate composition (% wt)	C	H	O	N	S	Cl	Non-combustible		
	59.60	11.60	18.32	0.52	0.44	0.87	8.65		
Heat value (kcal/kg)	Actual	H _h	6,596						
		H _l	6,562						
	Theoretic	H _h	7,544						
		H _l	6,919						

Table 2 Inlet conditions of gas and air

Gas	Flowrate of gas (Nm ³ /hr)	Preheated temperature (K)	Distribution ratio of gas and primary air (%)																Flowrate of Secondary air (Nm ³ /hr)		
			Hopper-A								Hopper-B									Side air	
			#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	#13	#14	#15	#16			
	12000	400	1	1	1	2	3	4	5	8	10	15	15	10	10	8	5	2	0	0	
Air	Flowrate of primary air = 15000 (Nm ³ /hr)	Case 1	400	20								50								30	0
		Case 2	400	20								50								30	6780 (5 holes)
		Case 3	400	20								50								30	10200 (5 holes)
		Case 4	400	20								50								30	6780 (7 holes)
		Case 5	400	20								50								30	10200 (7 holes)

수치계산은 Table 2에 나타난 바와 같이 case 1을 기준으로 2차 공기 주입의 효과 및 2차 공기 분사방법에 따른 영향을 살펴보기 위하여 2차 공기구멍의 개수와 2차 공기의 유량을 변화시켜 가면서 계산을 수행하였다. Table 2에 각 case별 연소용 가스와 공기의 입구조건을 나타내었다. 수치계산에서 폐기물의 연소과정은 계산이 빠르면서도 온도장 및 유동장에 큰 영향을 미치지 않는 메탄의 연소반응으로 대체하여 계산하였다. 연소과정에서 메탄(CH₄)의 양은 폐기물의 총 발열량과 동일한 발열량을 갖는 메탄의 양을 계산하여 수치계산에 사용하였다. 연소반응은 다음 식(1)과 같이 메탄의 2단 연소반응(two-step reaction)을 사용하였다.



2.2 수치해석 방법

소각로의 연소실 내에서는 화학반응을 동반한 유동장이 형성되며, 일반적으로 난류, 상변화/화학반응 및 대류/복사 열전달을 수반한다. 이와 같은 연소 유동장을 수치적으로 해석하기 위해서는 이와 관련된 여러 방정식들이 적절히 선택 및 적용되어야 한다. 본 연구에서는 연소실 내의 유동장과 온도분포를 계산하기 위해 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식을 사용하였으며, 난류모델로는 standard $k-\epsilon$ 모델, 복사모델로는 P1 모델을 사용하였다. 또한, 연료에 포함된 각 화학종의 계산을 위해서 화학종 보존방정식을 사용하였으며, 화학반응 과정을 예측하기 위한 모델로서 여러 가지 연료에 대해 광범위하게 사용할 수 있고 난류확산 화염 및 이와 유사한 화학반응 과정을 정확히 예측할 수 있는 혼합분율/확률밀도 함수(Mixture Fraction/Probability Density Func-

tion, PDF) 모델을 사용하였다. 수치계산에 사용된 각 방정식들은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i u_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}$$

에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_j h_j J_j + S_h \quad (4)$$

$$\text{여기서, } h = \sum_i m_i h_i, \quad h_i = \int C p_i dT$$

J_j : flux of species j

S_h : chemical reaction etc.

Standard $k-\epsilon$ model

$$\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - G_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } u_i = \rho C_\mu k^2 / \epsilon, \quad G_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$G_\mu = 0.99, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

P1 model

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = 0 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } q_r = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G = \Gamma \nabla G$$

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s}$$

q_r = radiation flux

G = incident radiation

화학종 보존방정식

$$\frac{\partial(\rho u_i m_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial J_i}{\partial x_i} + S_i \quad (8)$$

$$\text{여기서, } J_i = -\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_i}$$

m_i : mass fraction of species i

$D_{i,m}$: diffusion coefficient for species i

S_i : source term of species i

Mixture Fraction / PDF

$$\frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_f} \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i} \right) + S_m \quad (9)$$

$$\text{여기서, } f = \frac{Z_k - Z_{k0}}{Z_{kF} - Z_{k0}} : \text{mixture fraction}$$

\bar{f} : time averaging of f

격자계는 약 30만개의 비정렬 격자로 구성하였으며, 수치계산은 SIMPLE 알고리즘을 사용하는 상용 CFD 코드인 FLUENT 6를 사용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 2차 연소실 입구부분에 2차 공기 주입을 위한 공기구멍을 설치하여(각 면에 5개 또는 7개) 2차 공기 주입의 효과 및 주입방식에 따른 연소특성을 파악하였다.

3.1 소각로 내의 유동특성

2차 공기 주입에 따른 소각로 내의 유동특성을 제시하기 위해 Fig. 3에 case 1과 case 2의 속도 벡터를 나타내었다. Case 1과 case 2 두 경우 모두 side air hole을 통해 주입된 고속의 공기가 중심부에서 충돌하고, 이로 인하여 벽면 근처에 약한 재순환 영역이 형성된다. 또한, 단면적이 줄

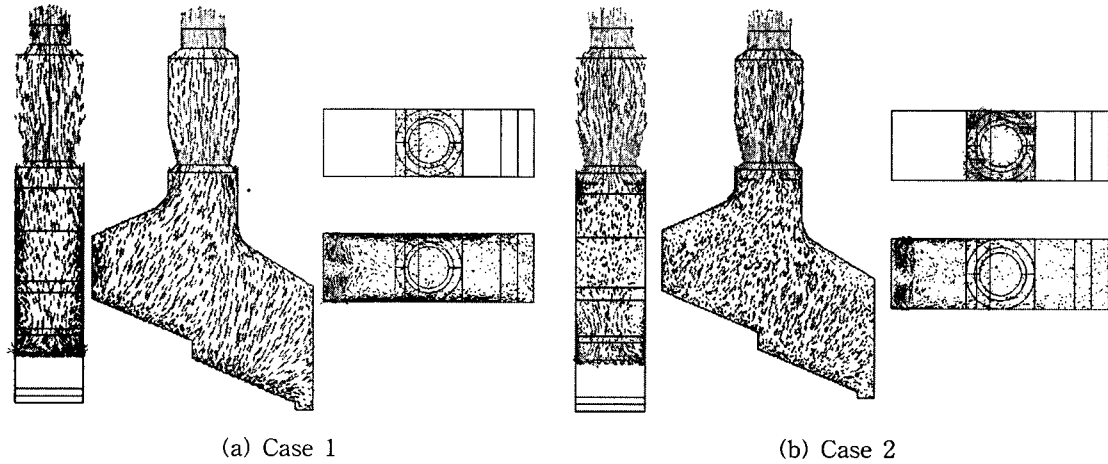


Fig. 3 Velocity vector at the iso-surfaces (A, B, C, D).

어드는 2차 연소실 입구부분과 출구부분에서는 속도가 증가한다. Case 2의 경우에는 2차 공기의 유입으로 인해 2차 연소실 입구부분에서 선회류가 발생된다.

2차 공기에 의해 발생되는 선회의 정도를 확인하기 위해 Fig. 4에 2차 공기의 path line을 나타내었다. Case 2의 경우에는 비교적 완만한 경사의 선회류가 발생되고, case 3의 경우에는 2차 공기 유량의 증가로 인해 유속이 매우 빨라지기 때문에 도우넛 형태의 매우 급한 경사의 선회류가 발생된다. Case 4의 경우에는 2차 공기구멍의 개수가 늘어나 유속이 감소하기 때문에 case 2보다 약간 더 완만한 경사의 선회류가 발생된다. 또한, case 5의 경우에도 유량의 증가로 인해 유속이 증가하기 때문에 case 4에 비해서는 약간 더 급하고 case 3에 비해서는 약간 더 완만한 경

사의 선회류가 발생된다. 이와 같은 선회류는 연소가스와 공기의 혼합을 증진시키고, 유적(flow path)의 길이를 증대시키는 효과가 있다.

3.2 소각로 내의 연소특성

Fig. 5에 나타낸 바와 같이 case 1의 경우에는 건조단(왼쪽 화격자) 부분에서는 공기가 부족하여 충분한 연소가 이루어지지 않기 때문에 미연가스로 인하여 비교적 저온영역이 형성되고, 주연소단(오른쪽 화격자)에서는 비교적 공기가 충분히 공급되어 높은 온도영역이 형성된다. Case 2의 경우에는 건조단 부분과 주연소단 부분의 온도분포는 case 1과 비슷하나 2차 연소실 입구부분은 각 면 5개씩의 공기구멍을 통해 유입되는 2차 공기로 인하여 미연가스의 2차 연소가 발생하

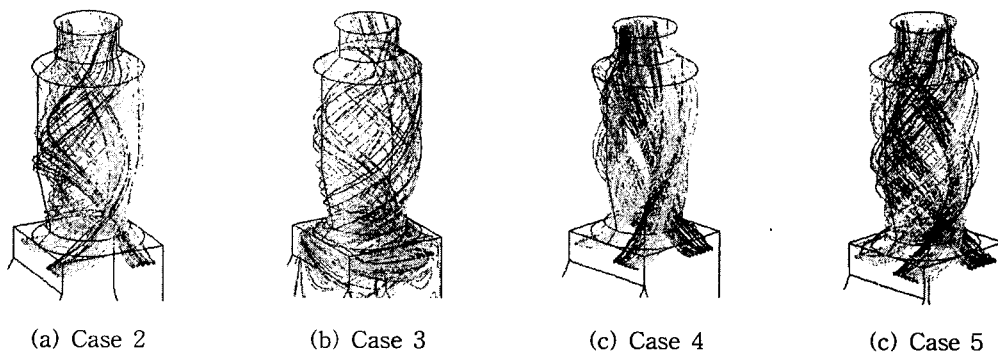


Fig. 4 Path lines of secondary air.

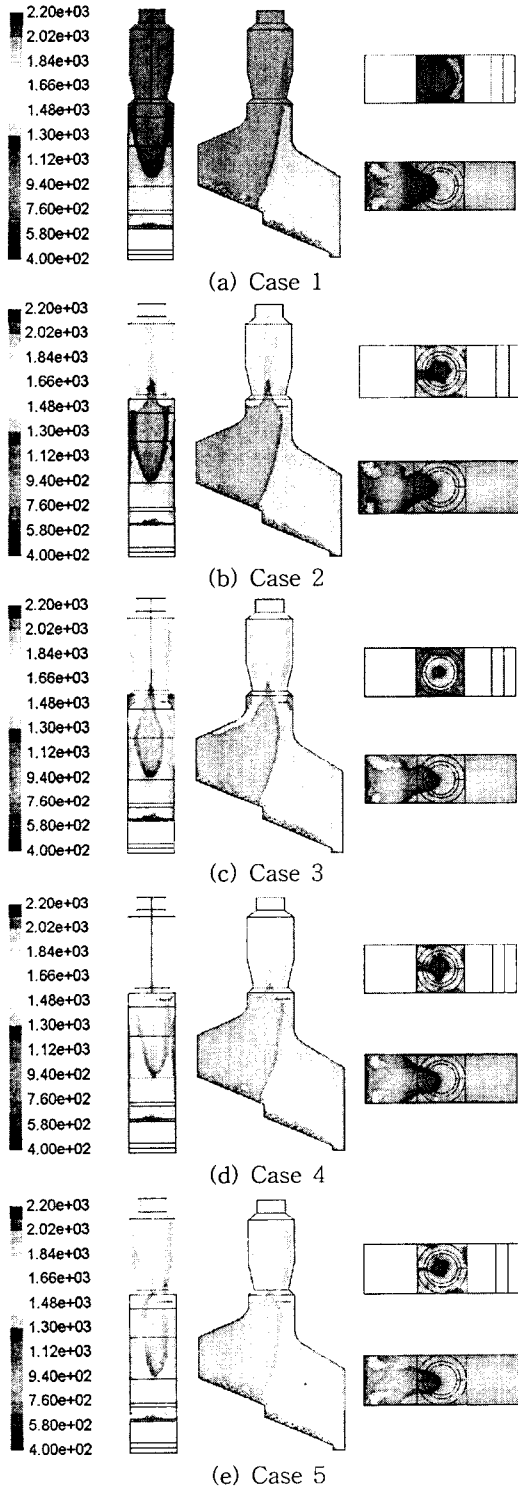


Fig. 5 Temperature distribution at iso-surfaces (A, B, C, D)(unit: K).

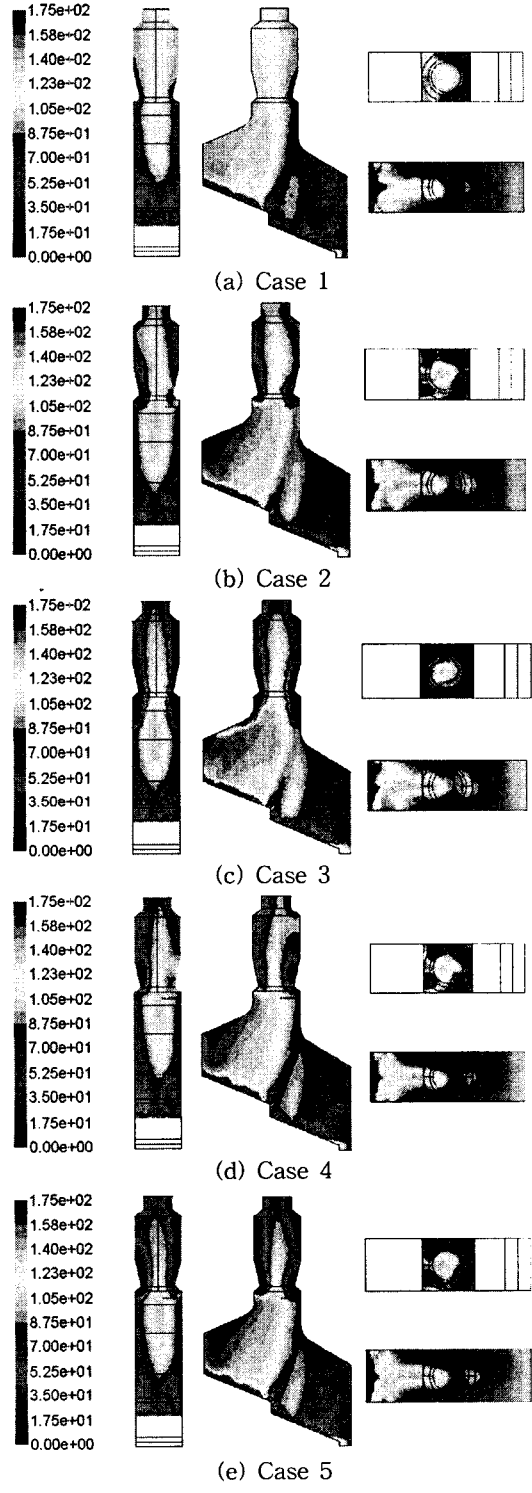


Fig. 6 Concentration of CO at iso-surfaces (A, B, C, D)(unit: ppm).

여 고온영역이 형성된다. Case 3의 경우에는 Fig. 4의 (b)에 나타낸 바와 같이 강한 선회류가 발생하기 때문에 2차 연소실 입구부분에서 도우넛 형태의 고온영역이 형성된다. Case 4의 경우는 case 2와 달리 2차 공기가 7개의 공기구멍을 통해 유입된다. 따라서, 2차 공기의 유속이 case 2에 비해 느리기 때문에 강한 선회류를 일으키지는 못하지만, 공기구멍 수의 증가로 인해 혼합 효과가 증진되어 case 2보다 더 넓은 고온영역을 나타내었다. Case 5의 경우는 2차 공기의 유량이 증가된 것이기 때문에 case 4에 비해 좀더 강한 선회류가 형성되어 가장 넓은 고온영역을 형성한다. 또한, 모든 case에서 side air 유입부 부근과 side air가 충돌하는 중심부분에서 고온영역이 형성되는데, 이것은 side air가 연료와 공기의 혼합을 증진시켜 연소가 활발히 일어나기 때문이다.

일반적으로 소각로 내의 연소상태를 효율적으로 파악하기 위한 척도로서 Fig. 6과 같이 일산화탄소(CO)의 농도를 사용한다. Case 1의 경우에는 출구까지 비교적 CO의 농도가 높게 나타나고 있다. 특히, 건조단 부분에서는 공기의 부족으로 인하여 거의 대부분 1차 반응만 일어나므로 고농도의 일산화탄소가 형성되는 것으로 나타났다. Case 2의 경우에는 2차 공기의 유입으로 인해 case 1과 달리 출구 쪽으로 갈수록 CO의 농도가 낮아짐을 알 수 있다. Case 3의 경우에는 2차 공기의 유량이 증가하였기 때문에 출구 쪽으로 갈수록 case 2보다 더 급격히 CO 농도가 감소한다. 특히, 건조단 쪽에서 벽을 타고 올라오는 미연가스 대부분이 연소되어 비교적 낮은 CO 농도를 나타냄을 알 수 있다. Case 4의 경우에 case 2와 CO의 분포형태는 유사하나 대체로 CO 농도가 낮게 나타났다. Case 5의 경우에는 case 4에 비해 2차 공기 유량이 증가하였기 때문에 출구에서 가장 낮은 CO 농도를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 소각장에서 사업장 폐기물 소각용으로 사용되고 있는 1,500 kg/hr급 스토커형 소각로에 대하여 3차원으로 수치해석을 수행하여, 2차 공기 효과, 2차 공기 분사방법 및 2차 공기 유량에 따른 유동특성, 온도분포, 농도분포 등의 연소특성을 해석하여 폐기물 소각로의 효율

적인 운전조건을 파악하였다.

수치해석 결과 연소과정에서 2차 공기의 주입은 선회류를 발생시키며, 이러한 선회류는 연소가스와 공기의 혼합 및 유적(flow path)의 길이를 증가시켜 미연가스의 2차 연소를 증진시킨다. 또한, 2차 공기의 주입방법에 따라 연소특성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 각 면에 7개의 공기구멍을 통해 유입되는 경우가 5개의 공기구멍을 통해 유입되는 경우보다 더 효율적으로 연소가 일어난다. 그리고 2차 공기의 유량변화에 대한 영향은 더 많은 case에 대해 연구가 이루어져야 되겠지만, 소각로 내의 온도를 저하시키지 않는 범위 내에서는 2차 공기의 유량이 증가할수록 더 강한 선회류가 발생하여 더 효율적으로 연소된다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 2003년 학술진흥재단의 지원(KRF-199-005-E00025)에 의하여 수행되었음을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ohm, T. I. and Jang, D. S., 1998, Numerical analysis of the stoker incineration process for the municipal solid waste, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 16, No. 4, pp. 378-385.
2. Park, B. S., Yun, Y. S., Seo, J. D. and Lee, J. W., 2000, Numerical simulation of waste combustion from the result of experiment of 50 ton/day MSW incinerator, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 17, No. 8, pp. 899-906.
3. Kim, H. Y., Chun, C. K. and Hwang, H. Y., 1998, The study on the combustion model and combustion characteristics for stoker type incinerator, Trans. of KSME (B), Vol. 22, No. 5, pp. 627-639.
4. Ryu, C. K., Shin, D. H. and Choi, S. M., 2001, Combined bed combustion and gas flow simulation for the MSW incinerator, J. Korean Solid Wastes Engineering Society, Vol. 18,

- No. 2, pp. 180-188.
5. Lee, J. W., Kim, S. C. and Yang, J. M., 2000, Numerical analysis for effect of swirl on the combustion characteristics and residence time in the pyrolysis gas combustor, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 17, No. 4, pp. 480-488.
 6. Choi, J. H., Ryu, C. K., Shin, D. H. and Choi, S. M., 2000, A case study; Improvement of operating conditions in a 200 t/day MSW incinerator, J. Korea Solid Wastes Engineering Society, Vol. 17, No. 1, pp. 9-18.